

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí
Ekologie a ochrana prostředí, Ochrana životního prostředí

VLIV JADERNÉ HAVÁRIE V ČERNOBYLU NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ
THE IMPACT OF THE NUCLEAR ACCIDENT AT CHERNOBYL ON THE
ENVIRONMENT

Zpracovatel práce: Markéta Dvořáková
Vedoucí práce: RNDr. Rudolf Přibil, CSc.

červen, 2010

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Praze dne

Děkuji RNDr. Rudolfu Přibilovi, CSc. za cenné rady, připomínky a odborné vedení během mého vypracování bakalářské práce.

ABSTRAKT

Moderní civilizace je závislá na produkci energie, ovšem jediné zdroje energie, které jsou schopny pokrýt naše potřeby, jsou energie získaná spalováním fosilních paliv a energie získaná jaderným štěpením. V souvislosti s využíváním jaderné energie mají lidé obavy jednak z rizika jaderné havárie, a dále z ukládání radioaktivních odpadů pod zemským povrchem.

Moje práce se soustředí zejména na riziko havárie jaderné elektrárny, které je demonstrováno na příkladu havárie jaderné elektrárny v Černobylu. V Černobylu byly zastaralé typy jaderných reaktorů a personál, který elektrárnu obsluhoval, nebyl dostatečně připraven na prováděný experiment. Po výbuchu jaderné elektrárny v Černobylu se do ovzduší uvolnilo velké množství radionuklidů, které zasáhly především nejbližší okolí elektrárny, kde byla vyhlášena třicetakilometrová zakázaná zóna.

Moje práce se zabývá důsledky této jaderné katastrofy v Černobylu na životní prostředí, a to jak z hlediska zdravotních následků pro obyvatelstvo, tak i působení na živočichy a rostliny zejména v blízkém, ale i vzdáleném okolí elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA: Černobyl, jaderná elektrárna, jaderná energie, radionuklidy, životní prostředí

ABSTRACT

Modern civilization is dependent on the production of energy. But there are only two energy sources that can cover our energy needs: the energy produced by burning fossil fuels and the energy produced by nuclear fission. People are afraid of nuclear accidents and storage of radioactive waste in relation with the use of nuclear energy.

My work focuses on the risk of a nuclear accident, which is demonstrated on the Chernobyl nuclear accident. There were obsolete types of nuclear reactors at Chernobyl. The staff, which serviced the power plant, was inadequately prepared for the experiment. A lot of radionuclides released into atmosphere after the explosion at Chernobyl. They affected mainly the near area from the power plant. There was announced the thirty kilometers large Zone of Alienation.

My work deals with the consequences of the accident at Chernobyl for environment - health effects for people and the exposure to animals and plants in the near but also in farther area from the Chernobyl nuclear power plant.

KEY WORDS: Chernobyl, nuclear power plant, nuclear energy, radionuclides, environment

ÚVOD	7
1. ZDROJE ENERGIE	8
2. VLIV PRODUKCE JADERNÉ ENERGIE NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	9
2.1. Vliv provozu jaderných elektráren a elektráren spalujících uhlí na ovzduší.....	9
2.2. Problematika nakládání s radioaktivními odpady	10
3. BEZPEČNOST PROVOZU JADERNÝCH ELEKTRÁREN.....	11
4. PRODUKCE JADERNÉ ENERGIE VE SVĚTĚ	12
5. JADERNÁ HAVÁRIE V ČERNOBYLU	13
5.1. Hodnocení jaderných havárií	13
5.2. Účinek radiace na lidské tělo	13
5.3. Lokalizace elektrárny Černobyl a funkce jejích reaktorů.....	14
5.4. Experiment předcházející výbuchu v jaderné elektrárně Černobyl.....	14
5.5. Situace bezprostředně po havárii a v následujících měsících.....	16
5.6. Znečištění životního prostředí radionuklidy v důsledku černobylské havárie	17
5.6.1. Aplikace MESOS	17
5.6.2. Hlavní radionuklidy uniklé do životního prostředí	18
5.6.3. Rozdílné zasažení různých evropských států	19
5.7. Zdravotní následky havárie v Černobylu	19
5.8. Oběti černobylské havárie	20
5.9. Dětská nemocnost v oblasti černobylské elektrárny po jejím výbuchu	20
5.9.1. Rakovina štítné žlázy	20
5.9.2. Další onemocnění dětí v důsledku černobylské havárie	21
5.10. Kvalita životního prostředí v zakázané zóně.....	21
5.10.1. Vliv na živočichy v okolí Černobylu	21
5.10.2. Vliv na rostliny v okolí Černobylu.....	22
5.11. Radioaktivní zamoření vzdálenějších oblastí	22
ZÁVĚR.....	24
SEZNAM LITERATURY	25
PŘÍLOHA 1: PŘEHLED JADERNÝCH REAKTORŮ VE SVĚTĚ, SPOTŘEBA	
URANU.	28

ÚVOD

Fosilní paliva nejsou nevyčerpatelná a jejich zásoby se stále ztenčují. Klasické spalování uhlí v tepelných elektrárnách způsobuje navíc velkou zátěž pro životní prostředí. Nicméně dnešní západní společnost je velice energeticky náročná a bez elektrické energie si prakticky nedokážeme představit ani její základní fungování. Obnovitelné zdroje energie jsou sice poměrně ekologické, ale zatím ve srovnání s klasickými zdroji energie absolutně nedostačující.

Jaderná fúze má proto určitě budoucnost, ovšem lidstvo je zatím na začátku využívání této technologie. Na tomto poli probíhá intenzivní výzkum, doposud se však ani experimentálně nepodařilo jadernou fúzi přiblížit brzkému praktickému využití.

Jaderné štěpení je zdroj energie, který má velký potenciál, protože, jak dále vysvětlím, je poměrně ekologický a poskytuje velké množství vyprodukované energie. Nese s sebou však riziko potenciální havárie jaderné elektrárny. Kategorickou podmínkou v souvislosti s využíváním jaderné energie je také nezbytná nutnost vyřešit problematiku ukládání jaderného odpadu.

V Černobylu došlo k dosud nejhorší havárii jaderné elektrárny v dějinách lidstva. Ve své práci popisuji situaci, která vedla k havárii, jaké zde byly typy jaderných reaktorů, a dále plánovaný a skutečný průběh experimentu, při kterém k havárii došlo. Dále se zabývám postupem Sovětského svazu po havárii a reakcí ostatních evropských států na vzniklou situaci. Na příkladech provedených vědeckých výzkumů demonstruji, jak havárie ovlivnila lidské zdraví a životní prostředí v blízkém i vzdálenějším okolí elektrárny Černobyl.

1. ZDROJE ENERGIE

Zdroje energie dělíme na obnovitelné a neobnovitelné, přičemž mezi těmito dvěma skupinami není ostrá hranice. Obnovitelné zdroje energie jsou takové, jejichž rychlost spotřeby je nižší než rychlost přirozené obnovy. Patří sem zejména sluneční energie, kterou lze přímo využít v solárních elektrárnách její přeměnou na elektrickou energii, a její transformované podoby – větrná a vodní energie. (*Braniš et al., 2004*)

Neobnovitelný zdroj energie je pak takový, jehož rychlost spotřeby je větší než rychlost přirozené obnovy. Představa neobnovitelných zdrojů energie vychází z předpokladu konečného objemu Země, a tedy i konečného množství vytěžitelných látek. Patří sem tedy fosilní paliva – ropa, uhlí a zemní plyn. I jejich původ lze odvozovat od sluneční energie, neboť fosilní paliva vznikla rozpadem rostlinných a živočišných těl. Rostliny přeměňují sluneční energii na energii chemických vazeb v procesu fotosyntézy. Živočiškové pak zabudovávají tuto energii do svých těl po zkonzumování rostlinné potravy (herbivoři) či živočišné potravy (predátoři). (*Pivnička, 1984; Braniš et al., 2004*)

Jadernou energii lze zařadit mezi zdroje neobnovitelné, neboť množství uranu v zemské kůře je omezené. Lze ji však zařadit i do zdrojů obnovitelných, protože počítáme-li s využitím množivých reaktorů a thoria, kterého je v zemské kůře přibližně trojnásobně více než uranu, zjistíme, že lidstvo bude moci energii jaderného štěpení využívat pravděpodobně po následující čtyři tisíciletí, což je tak dlouhá doba, že lze jadernou energii řadit na relativní úrovni mezi zdroje obnovitelné. (*Baran, 2002*)

Jaderná energetika dnes produkuje asi 17 % spotřeby elektrické energie ve světě, takže je prozatím pouze doplňkovým zdrojem energie. 19 % celkové vyrobené energie náleží hydroelektrárnám. Zbýlé téměř dvě třetiny jsou vyráběny elektrárnami na fosilní paliva, v nichž je teplo generováno spalováním uhlí, ropy nebo zemního plynu. Příměsi v těchto palivech, zejména síra, ale i další stopové prvky, včetně radioaktivních, jsou hlavním zdrojem znečištění ovzduší na Zemi. (*Baran, 2002; Braniš et al., 2004*)

Ani obnovitelné zdroje energie nejsou zcela bez ekologických problémů. Například větrné elektrárny vadí ptákům na jejich tazích, navíc aby vyrobily dostatečné množství energie pro průmyslové potřeby, muselo by jich být v krajině tolik, že by výrazně narušily její ráz. (*Baran, 2002*)

Souhrnem lze říci, že klasické elektrárny na fosilní palivo, jaderné elektrárny a hydroelektrárny představují základní zdroje energie, a zřejmě tomu tak bude i v budoucnu.

Poměr energie získané z jednotlivých zdrojů se však pravděpodobně změní ve prospěch využívání jaderné energie. (Baran, 2002)

2. VLIV PRODUKCE JADERNÉ ENERGIE NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

2.1. Vliv provozu jaderných elektráren a elektráren spalujících uhlí na ovzduší

Jak už bylo řečeno dříve, jaderné energetika má vysoký potenciál. Další její výhodou je „čistota“ ve vztahu k životnímu prostředí. Jaderný reaktor sice produkuje radioaktivní odpad, který je při bezproblémovém provozu jaderné elektrárny hlavní zátěží pro životní prostředí, ovšem emise tepelných elektráren nesou také určitý podíl radioaktivity, neboť v uhlí je obsaženo velmi malé množství uranu (5-10 ppm). Na každých sto až dvě stě tisíc tun uhlí tak připadá jedna tuna uranu. Přitom je však třeba vzít v potaz, že tepelná elektrárna spotřebovává nepoměrně větší množství uhlí než jaderná elektrárna uranového paliva, neboť z jednoho kilogramu uhlí lze získat pouhých 8 kWh energie, naproti tomu z kilogramu štěpného uranu lze získat 23 milionů kWh energie. Nepřímým důsledkem spalování uhlí v tepelných elektrárnách je zatížení životního prostředí dopravou, neboť obrovské množství spalovaného uhlí se musí k elektrárně dopravit prostřednictvím železniční dopravy, přičemž zátěž životního prostředí je zde výrazně vyšší než při přepravě uranového paliva k jaderné elektrárně. (Baran, 2002)

Srovnáme-li jaderné a uhelné elektrárny z hlediska jejich vlivu na životní prostředí při jejich běžném provozu, zjistíme, že jaderná elektrárna neprodukuje při své činnosti kromě radioaktivního odpadu téměř žádné problematické látky zatěžující životní prostředí. Naproti tomu při provozu uhelné elektrárny dochází k emitování značného množství oxidů dusíku, uhlíku a síry do ovzduší. Oxid uhličitý (CO_2) je prokazatelně skleníkovým plynem. O vlivu lidské činnosti na oteplování zemského klimatu se vedou rozepře ve vědeckých kruzích, jisté ovšem je, že během spálení uhlí v tepelné elektrárně se uvolní do ovzduší během krátké doby výrazně větší množství CO_2 , než by tomu tak bylo v přírodě za přirozených podmínek. Oxidací oxidů síry (SO_2) a dusíku (NO_x) a jejich reakcí s vodou vznikají anorganické kyseliny, které jsou příčinou vzniku kyselé atmosférické depozice, jež má také neblahý vliv na životní prostředí (snížování pH povrchových i podzemních vod a uvolňování toxických kationtů hliníku). (Baran, 2002; Braniš et al., 2004)

2.2. Problematika nakládání s radioaktivními odpady

Nakládání s radioaktivními odpady vyvolává ve veřejnosti pravděpodobně ještě silnější obavy než samotný provoz jaderných elektráren. Odpůrci využívání jaderné energie argumentují tím, že ukládání radioaktivních odpadů v zemské kůře není zodpovědné vůči následujícím generacím. Pravdou je, že ukládání radioaktivních odpadů není ve světě stále dořešeno. Cílem probíhajících výzkumů je najít takovou lokalitu, která by byla nejvhodnější pro hlubinné uložení radioaktivních odpadů. Horniny, které jsou v současné době považovány za nejvhodnější pro skladování radioaktivního odpadu, jsou žula, rula a čedič. (Marek, 2000)

V České republice nese původce radioaktivního odpadu náklady spojené s jeho uložením podle atomového zákona z roku 1997. Stát ručí za bezpečné ukládání radioaktivních odpadů podle tohoto zákona. Ministerstvo průmyslu a obchodu zřídilo Správu úložišť radioaktivních odpadů, jejíž činnost je financována z jaderného účtu vedeného u České národní banky. Zdrojem financí pro tento účet jsou platby původců radioaktivních odpadů. V České republice jsou v současné době v provozu tři úložiště radioaktivních odpadů, přičemž pro ukládání radioaktivních odpadů z jaderných elektráren Dukovany a Temelín jsou využívána úložiště Dukovany a Richard. (SÚJB, 2010)

V gabonském uranovém dole objevili francouzští vědci „přírodní“ jaderný reaktor Oklo. Před asi 1,7 miliardy let zde po dobu asi půl milionu let probíhala řetězová štěpná reakce v důsledku vysokého obsahu uranu ^{235}U v rudě. Rozštěpilo se asi 12 000 tun uranu a vzniklo odpovídající množství radioaktivního odpadu. Radioaktivní odpad se nikdy nepřesunul dále, než do bezprostřední blízkosti uranového ložiska. Navíc jeho chování odpovídalo tomu, co pro chování radioaktivních odpadů předpokládají současné modely používané pro hodnocení bezpečnosti ukládání radioaktivních odpadů. Tento „přírodní experiment“ nám tak může sloužit jako vodítko při hledání vhodného řešení pro nakládání s radioaktivními odpady. (Marek, 2000)

3. BEZPEČNOST PROVOZU JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Riziko ztráty lidských životů nevzniklo s civilizovanou společností, ale bylo tu od pradávna. Moderní civilizace některá rizika vyloučila (například roztrhání člověka šelmou), ale přinesla s sebou nová rizika, označovaná jako civilizační. Zvýšené riziko je spojené především s průmyslovou výrobou, tedy i s provozem jaderných elektráren. Důvodem, proč nemůže v jaderné elektrárně dojít k nekontrolovanému výbuchu, jako je tomu v atomových bombách, je především to, že se do reaktoru nikdy nedostane nadkritické množství silně obohaceného paliva. Naproti tomu v atomové bombě se záměrně udržuje odděleně několik množství podkritických, která se spojí v množství nadkritické, v důsledku čehož dojde k zamýšlenému výbuchu. (*Comby, 2007*)

Moderní jaderné tlakovodní elektrárny jsou budovány tak, že v případě havárie zůstane radioaktivní materiál přikrytý ochrannou obálkou, kontejnmentem, který zabrání úniku radioaktivity do okolního prostředí. Převážná část radioaktivních látek je soustředěna v jaderném palivu, které je uloženo v kovových trubkách. V případě poškození těchto kovových trubek brání dalšímu šíření radioaktivních látek ocelové stěny tlakové nádoby reaktoru. Pokud by došlo k poškození i těchto ocelových stěn, zabránila by šíření radioaktivních látek právě ochranná obálka, kontejnment. (*Peřina et al., 1986*)

Zajímavé je, že se lidé tolik bojí právě jaderné energie, a jiná, o několik řádů větší, nebezpečí je tolik nerozrušují. Je tomu tak pravděpodobně proto, že lidé nejsou o jaderné energii a jejím využívání dostatečně informováni. Úmrtí v důsledku automobilových nehod jsou pro většinu lidí lehce pochopitelná, a tudíž zdánlivě přijatelnější. V lidech vyvolává nedůvěru v bezpečnost jaderných elektráren také to, že ionizující záření není postižitelné jejich smysly. V jaderném reaktoru dochází k jadernému štěpení, přičemž vzniká typ ionizujícího záření, který nazýváme radioaktivním zářením. Ionizující záření lze sice přesně detekovat pomocí přístrojů, ovšem lidé z něj mají obavy, protože je sami nedokážou v prostředí rozpoznat. (*Peřina et al., 1986; Baran, 2002*)

Lidský život bude vždy ohrožen určitými typy nebezpečí a je třeba, abychom objektivně posoudili jejich druh a stupeň rizika. Neměli bychom nějaké nebezpečí považovat za horší jen proto, že je nové a neznámé. Jiná, prozkoumaná, rizika působí často mnohem větší škody, ale my jsme s nimi smířeni jen proto, že je již známe.

4. PRODUKCE JADERNÉ ENERGIE VE SVĚTĚ

Jaderná energie byla prověřena především ve Francii, protože ta z ní získává přibližně 80 % své energetické produkce, má v provozu 58 jaderných elektráren a je v současné době světovým vůdcem v produkci jaderné energie. Francie vyprodukovala 418 bilionů kWh jaderné energie za rok 2008, což činilo 76 % celkové energie vyprodukované touto zemí za rok 2008. Francie produkuje pouze 6,3 tuny CO₂ na obyvatele za rok. Ve Švýcarsku je to 6,6 tuny (vodní elektrárny), ve Velké Británii 9,4 t, v Dánsku 9,6 t, v Německu 10,3 t, v Austrálii 14,9 t a v USA 19,7 t. (*Comby, 2007; WNA, 2010*)

Během dvaceti let od roku 1973 do roku 1993 se atmosférické znečištění ve Francii na kWh vyrobené elektřiny snížilo díky využívání jaderné energie desetkrát. Je načase, aby celý svět napodobil Francii v nižší spotřebě energie, obrátil se k jaderné energii a přestal znečišťovat atmosféru spalováním fosilních paliv. (*Comby, 2007*)

Francie je velmi dobře zabezpečená pro případ jaderné havárie. Je zde 23 tzv. jednotek CMIR (mobilní radiologické zásahové jednotky) připravených zasáhnout při haváriích kdekoli v zemi. Jsou tvořeny speciálně vyškolenými hasiči a vybaveny patřičnou ochranou a zásahovým materiálem. (*Comby, 2007*)

V současné době mají nejvyšší počet jaderných reaktorů USA (104). USA vyprodukovaly 809 bilionů kWh energie za rok 2008, což činilo přibližně 20 % jejich celkové produkce energie za tento rok. Další v pořadí v počtu jaderných reaktorů je již zmiňovaná Francie (58 reaktorů) a po ní následuje Japonsko s 54 jadernými reaktory. Japonsko vyprodukovalo 240 bilionů kWh jaderné energie za rok 2008, což tvořilo přibližně čtvrtinu jím vyprodukované energie v tomto roce. (*WNA, 2010*)

Další země, které stojí za zmínku z hlediska produkce jaderné energie, jsou Rusko (152 bilionů kWh), Jižní Korea (144), Německo (141), Kanada (88), Ukrajina (84), Čína (65), Švédsko (61), Španělsko (56), Velká Británie (52), Belgie (43). Uvedené údaje jsou za rok 2008. (*WNA, 2010*)

Arménie, Bulharsko, Česká republika, Finsko, Maďarsko, Slovensko, Slovinsko a Švýcarsko jsou země, které sice produkují poměrně malé množství jaderné energie, ale ta tvoří vysoký podíl v rámci celkové energie vyprodukované těmito zeměmi. (*WNA, 2010*)

V České republice se vyrobilo 25 bilionů kWh v roce 2008, což tvořilo 32 % celkové energie vyrobené v tomto roce u nás. V současné době je u nás v provozu šest jaderných reaktorů, z toho čtyři v Dukovanech a dva v Temelíně. (*WNA, 2010*)

5. JADERNÁ HAVÁRIE V ČERNOBYLU

5.1. Hodnocení jaderných havárií

Havárie v Černobylu byla nejen největší havárie v dějinách jaderné energetiky, ale současně i největší vůbec možná, protože nic zásadně horšího než přímé obnažení vlastního jádra reaktoru spolu s hořením grafitu nemůže ani nastat. (*Baran, 2002*)

Mezinárodní agentura pro atomovou energii klasifikuje mimořádné události v jaderných elektrárnách (ale i ve výzkumných reaktorech a v úložištích jaderného paliva) pomocí mezinárodní stupnice INES (The International Nuclear Event Scale). Tato stupnice má 7 hodnot, přičemž platí, že čím vyšší hodnota, tím větší katastrofa. Havárie v Černobylu dostala jako jediná stupeň 7. Stupeň 6 nemá zatím žádná událost. Havárie jaderné elektrárny stupně 5 byly ve světě dvě: v jaderné elektrárně ve Windscale (Velká Británie) a v jaderné elektrárně na Three Mile Island (USA). U jaderných elektráren v České republice byl ke klasifikaci použit nejvýše stupeň číslo 2. (*Comby, 2007*)

5.2. Účinek radiace na lidské tělo

Účinek radiace na lidské tělo se vyjadřuje v jednotkách sievert (Sv). Ve své práci používám jednotku mSv ($1 \text{ Sv} = 1000 \text{ mSv}$).

Na naší planetě se nacházejí místa s přirozenou radioaktivitou hornin, která přesto nejsou nebezpečná pro zdraví, protože i tyto dávky jsou malé na to, aby způsobily zdravotní potíže u místních obyvatel. Např. radiační pozadí v městě Ramsaru v Iránu činí 400 mSv za rok a v Guapari v Brazílii 175 mSv za rok. V České republice činí radiační pozadí 3 mSv za rok. (*Comby, 2007*)

Obdrží-li dospělý člověk jednorázovou dávku nižší než 300 mSv, nelze u něj pozorovat žádné vnější příznaky ozáření. Pro plod je tato hranice 100 mSv. Obdrží-li dospělý člověk jednorázovou dávku 300 až 700 mSv, nejsou také viditelné žádné vnější symptomy, ale asi tři týdny po ozáření je pozorovatelná mírná změna krevního obrazu – sníží se počet červených krvinek. Tento stav se upraví do dvou měsíců po ozáření. Obdrží-li člověk dávku 1000 mSv, pozorujeme mírné symptomy, které neohrožují lidský život: neklid, nevolnost, zvracení a horečku. Tyto symptomy zmizí samy i bez léčení. Dochází i k dočasným změnám krevního obrazu, které jsou důsledkem poškození kostní dřeně. Obdrží-li člověk dávku nad 3000 mSv, dochází ke změnám pokožky, a obdrží-li člověk dávku nad 8000 mSv, dochází

k průjmům a dýchacím potížím a jedinou šancí na přežití je podstoupit transplantaci kostní dřeně. (Comby, 2007)

Současný limit pro pracovníky jaderných elektráren v České republice činí 50 mSv za rok, ovšem pracují-li v elektrárně více let, je limit snížen na 100 mSv za pět let. Pro běžné obyvatelstvo je limit pro ionizující záření 1 mSv za rok pro součet ozáření ze všech záměrných činností se zdroji ionizujícího záření, který ovšem neplatí pro lékařská vyšetření za použití rentgenového záření či počítačové tomografie (CT). Při těchto vyšetřeních může pacient obdržet jednorázovou dávku až 10 mSv. Do tohoto limitu není zahrnuto ani horninové radiační pozadí (na našem území asi 3 mSv za rok). Je však třeba mít na paměti, že ani jednorázová dávka 100 mSv není škodlivá pro lidský plod, a tedy ani pro dospělého člověka. (SÚJB, 2010)

5.3. Lokalizace elektrárny Černobyl a funkce jejích reaktorů

Jaderná elektrárna v Černobylu stála na území bývalého Sovětského svazu, dnes se jedná o území na Ukrajině u hranic s Běloruskem. Byly zde čtyři 1000megawattové varné reaktory typu RBMK. Před výbuchem pracoval čtvrtý reaktorový blok tři roky bez problémů. Jednalo se však o zastaralé a nestabilní modely postavené bez kontejnmentu. (Comby, 2007)

V reaktoru typu RBMK slouží jako moderátor ke zpomalování neutronů vysoce hořlavý grafit. Reaktor má složitý chladicí systém a nedostatečný systém ochrany. Používaným chladicím médiem je voda, ve které vznikají v důsledku varu bubliny, tedy prázdná místa bez chladiva. V bublinách proto slouží jako moderátor grafit, přesto v nich jsou lepší podmínky pro štěpení uranu, protože voda má větší schopnost pohlcovat neutrony než grafit, v důsledku čehož výkon reaktoru se stoupající teplotou vody roste. Tento jev nazýváme kladný dutinový koeficient reaktivity. (ČEZ, 1991; Comby, 2007)

5.4. Experiment předcházející výbuchu v jaderné elektrárně Černobyl

K havárii v Černobylu nedošlo za běžného provozu, ale za mimořádného režimu, kdy byl na jaderném reaktoru prováděn celkem běžný experiment, který kdyby se neodchýlil od původního plánu, k žádné havárii by nedošlo. Cílem experimentu bylo ověřit, zda elektrický generátor je po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě nějakou dobu napájet čerpadla havarijního chlazení. Elektřina z elektrického generátoru je pro bezpečnost reaktoru velmi důležitá, pohání totiž chladicí čerpadla, regulační

a havarijní tyče a osvětluje velín a řídicí pult. Bylo plánováno snížit výkon na 25-30 % (tj. 700-1000 MW), což je nejnižší výkon, při kterém je povolen provoz reaktoru typu RBMK. Dále bylo v plánu odstavení první ze dvou turbín a odpojení havarijního chlazení (aby nemohlo působit během experimentu) a nakonec měl být přerušen přívod páry ke druhé turbíně.

Pokus však neproběhl tak, jak bylo původně plánováno. Test byl pojímán jako elektrotechnická záležitost, proto jej řídili elektrotechnici, nikoliv specialisté na jaderné reaktory.

25. dubna v jednu hodinu po půlnoci byl snížen výkon reaktoru na polovinu a byl odpojen systém havarijního chlazení, aby nenarušoval experiment. Poté byl test odložen o 9 hodin, protože se blížily svátky (1. máj). Po celou tuto dobu je však odpojen systém nouzového chlazení reaktoru, přestože je to proti předpisům. V pokusu musela pokračovat nová směna, která na něj nebyla připravena.

Od 23:10 25. dubna pokračovalo snižování výkonu. V průběhu přípravy testu měli operátoři problémy s udržení stability výkonu reaktoru. Došlo k prudkému poklesu výkonu reaktoru na 30 MW, to znamená, že došlo téměř k zastavení štěpné reakce. V tuto dobu měl být experiment zastaven, reaktor odstaven a nedošlo by k žádné havárii.

Operátoři se však snažili zvýšit výkon tím, že vytáhli regulační a havarijní tyče pohlcující neutrony, což byla osudová chyba. Povedlo se jim však zvýšit výkon pouze na 200 MW. Při tak nízkém výkonu byl provoz reaktoru zakázán. Reaktor byl v nestabilním stavu, operátoři měli problémy s udržení potřebných hodnot tlaku a obsahu páry v reaktoru. Za normálních okolností by již v takové situaci zasáhl havarijní systém. Ten byl však vypnut.

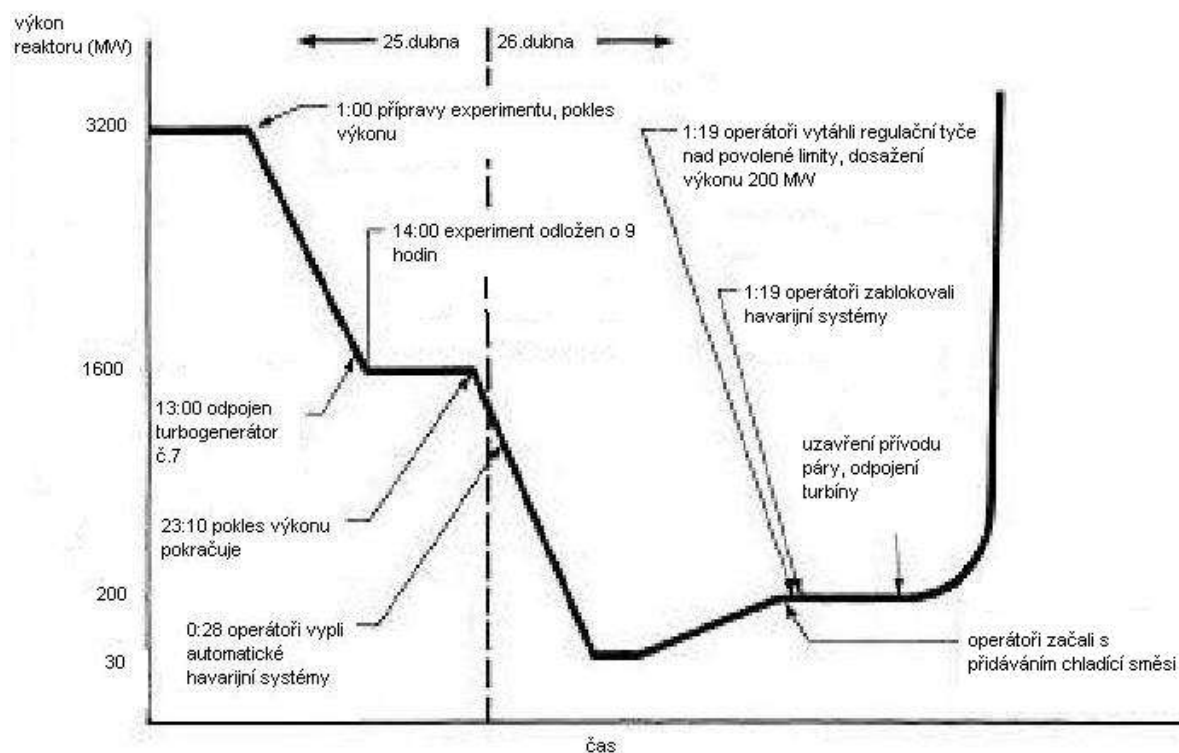
Reaktor běžel při výkonu 200 MW, snížil se však průtok chladicí vody, rostla její teplota i tlak. S rostoucím množstvím páry se zvyšovalo množství neutronů v aktivní zóně, a tím i počet štěpných reakcí atomu uranu. Tím vzrostl výkon a opět se zvyšovala teplota i množství páry v reaktoru (kladný dutinový koeficient reaktivity).

Vedení rozhodlo zasunout regulační a havarijní tyče do aktivní zóny reaktoru (1:23:40). Jejich zasunutí trvalo asi 30 vteřin (1 vteřina u západních reaktorů), štěpnou reakci se tak nepodařilo zastavit. Navíc kovové konce havarijních tyčí, které byly zasouvány do aktivní zóny, štěpnou reakci zpočátku ještě urychlily. Některé tyče se ani zasunout nepovedlo, protože jejich dráha byla zdeformována teplem. Celá situace vedla ke dvěma mohutným výbuchům (1:23:44). Reaktor byl přetlakován a pára nadzdvihla horní betonovou desku o

hmotnosti 1000 tun. Do reaktoru vnikl vzduch a reakcí vodní páry s rozžhaveným grafitem vznikl vodík, který explodoval a rozmetl do okolí palivo a 700 tun radioaktivního hořícího grafitu. Průběh celého experimentu vedoucího k výbuchu je znázorněn v grafu č. 1.

(ČEZ, 1991)

Graf č. 1: Chronologie událostí vedoucích k výbuchu JE v Černobylu.



(ApSimon et al., 1989, upraveno)

5.5. Situace bezprostředně po havárii a v následujících měsících

Sovětský svaz se snažil vše utajit, což však nebylo dlouhodobě možné. Švédové ráno po výbuchu naměřili detektory v jaderné elektrárně Forsmark zvýšenou radiaci. Správně odhadli, že radioaktivní spad pochází z oblasti Sovětského svazu. Oslovili proto sovětské velvyslanectví ve Švédsku, které ovšem označilo celou věc jako protisovětskou provokaci. I další evropské státy potvrdily, že muselo dojít k jaderné havárii velkých rozměrů, a označily dokonce i elektrárnu, kde muselo k havárii dojít: Černobyl. (Damveld, 1992; Poledne, 2001)

K evakuaci blízkého města Pripjať došlo více než 36 hodin po výbuchu (v sobotu 27. dubna). První byli evakuováni straničtí funkcionáři, až po nich zbylí obyvatelé. Úřady

zakázaly používat dozimetry, aby údaje o radioaktivitě zůstaly v tajnosti. Sovětský svaz celou událost přiznal až 28. dubna. (*Damveld, 1992*)

V Československu byl radioaktivní spad zaznamenán poprvé 29. dubna v jaderné elektrárně Jaslovské Bohunice a v krajské hygienické stanici v Hradci Králové. V naší zemi bylo obyvatelstvo velmi špatně informováno o celé situaci. Vláda sice tvrdila, že učinila potřebné kroky k ochraně zdraví obyvatelstva, obyvatelstvo však nedostalo téměř žádné informace o tom, jaké konkrétní kroky byly podniknuty. Obyvatelé proto v tuto dobu žili ve zbytečném strachu, kterému se dalo předejít poskytnutím dostatečných informací. (*Vaněk, 1996*)

2. května bylo vydáno rozhodnutí k evakuaci všech obyvatel v okruhu 30 km kolem Černobylu. Do 21. května byla třicetkilometrová zóna vyprázdněna. Bylo vystěhováno více než 500 tisíc lidí, z nichž 140 tisíc se již nesmělo na zasažené území vrátit. Evakuaci provázely značné problémy, řada lidí nechtěla své domovy opustit, především staří lidé, kteří zde často prožili celý svůj život. (*Damveld, 1992*)

Na podzim již bylo neobyvatelné území rozšířeno na 70 km, které byly obehnané plotem a vstup na ně byl možný jen po získání povolení. Na konci roku 1987 byla zakázána zóna zmenšena na 30 km. Dříve vystěhované území bylo znovu osídleno. (*Damveld, 1992*)

5.6. Znečištění životního prostředí radionuklidy v důsledku černobylské havárie

5.6.1. Aplikace MESOS

V několika dnech po výbuchu bylo užito meteorologických metod k pozorování následků katastrofy. Jednou z metod byla aplikace MESOS (zkratka pro mesoscale) vyvinutá ke studiu hypotetických jaderných nehod a posuzování rizika různých projektů. Hlavními cíli využívání této metody po výbuchu Černobylu bylo: 1) Porozumět tomu, jak se pohybují vzduchové hmoty nad Evropou a využít tyto znalosti jako rámec pro interpretaci měření. 2) Určit množství uvolněných radionuklidů a jejich množství pohybující se přes hranice Sovětského svazu. 3) Identifikovat, ve kterých oblastech Evropy budou v následujících dnech vypadávat srážky, a půda bude tak více kontaminována radioaktivními izotopy. 4) Odhadnout velikost dávky, která zasáhne evropskou populaci mimo Sovětský svaz. (*ApSimon et al., 1989*)

5.6.2. Hlavní radionuklidy uniklé do životního prostředí

Lidé byli vystaveni expozici radionuklidů čtyřmi cestami: přechodem radioaktivního mraku nad jejich hlavami, deštěm obsahujícím radionuklidy, vdechnutím radionuklidů a požitím radionuklidů s potravou. (*Barnaby, 1986*)

Nejdůležitější prvky vyskytující se v radioaktivním mraku pocházejícím z Černobylu byly jód ^{131}I a cesium ^{137}Cs . Každý z těchto prvků má jiný poločas rozpadu. Poločas rozpadu je doba, za kterou se přemění právě polovina celkového množství atomových jader. (*Comby, 2007*)

Radioaktivní jód má poločas rozpadu pouze 8 dní, takže byl nebezpečný pro obyvatelstvo jen několik týdnů po havárii. Kdyby bylo obyvatelstvo v okolí dostatečně informováno a neopouštělo obydli, nemusel by je jód téměř vůbec zasáhnout. Další zbytečnou chybou bylo i to, že Sovětský svaz odmítl pomoc USA v podobě zásilky tablet jódu pro obyvatelstvo. Kdyby obyvatelstvo užívalo běžný jód, nedošlo by k zasažení štítné žlázy radioaktivním jodem. (*Comby, 2007*)

Radioaktivní jód se soustředil v kravském, kozím a ovčím mléce. Do těla skotu se radioaktivní jód dostal z trávy a jiné vegetace. Po konzumaci mléčných výrobků lidmi se hromadil v jejich štítné žláze, kde vyvolával rakovinu, zejména u dětí. (*Barnaby, 1986*)

Radioaktivní cesium ^{137}Cs má poločas rozpadu 33 let, je tedy stále přítomno v životním prostředí. Snadno se začleňuje do suchozemských i vodních ekosystémů. Během prvních měsíců po černobylské havárii byl velmi intenzivně sledován jeho výskyt v životním prostředí. V Německu byl například prokázán jeho zvýšený výskyt v trávě, tělech domácích zvířat i vysoké zvěře. (*Danell et al., 1989; Comby, 2007*)

V severním Švédsku byl rok po havárii proveden výzkum týkající se hromadění radioaktivního cesia ^{137}Cs v těle losů. Bylo zjištěno, že obsah cesia v těle této vysoké zvěře stoupl po havárii na desetinásobek oproti situaci před havárií. Vyšší nárůst byl zachycen u telat a samic, což je patrně způsobeno rozdílnými stravovacími návyky mezi mladými a dospělými losy a mezi samci a samicemi. Zvýšený obsah radioaktivního cesia v tělech losů měl dopad i na lov této vysoké zvěře ve Švédsku. (*Danell et al., 1989*)

5.6.3. Rozdílné zasažení různých evropských států

Zpočátku bylo jen velmi málo informací o tom, jakou měrou jsou zasaženy černobylskou havárií ostatní evropské státy. Zmatek způsobovalo jednak to, že byly používány různé typy měření a měřicí techniky, pak také to, že každý stát zaujal k celé katastrofě jiný postoj. V důsledku toho jednotlivé oblasti vykazovaly rozdílné hodnoty kontaminace, někde vysoké, jinde nízké a některé oblasti neposkytovaly informace žádné. Některá měření sledovala pouze hodnoty alfa, beta a gama záření na určitých územích, zatímco jiná přímo výskyt určitých izotopů. Tak například Rakousko a Švýcarsko sledovaly hodnoty gama záření na svém území a přesně zaregistrovaly příchod radioaktivního oblaku nad své území. (*ApSimon et al., 1989*)

V den havárie mířila první vlna radioaktivního mraku ke Skandinávii, kde se stočila zpět na východ do SSSR. 27. 4. přešla druhá vlna radioaktivního mraku přes střední a západní Evropu. Zasaženo bylo Polsko, Československo, Německo, Francie, Belgie, Nizozemsko a Lucembursko. Třetí vlna radioaktivního mraku přešla přes jihovýchodní Evropu: zasaženo bylo Maďarsko, Rumunsko, Bulharsko a území bývalé Jugoslávie. (*ČEZ, 1991*)

5.7. Zdravotní následky havárie v Černobylu

Zdravotní následky havárie v bezprostředním okolí černobylské elektrárny nelze s jistotou určit, jednak proto, že Sovětský svaz informace o zdravotním zasažení obyvatelstva z politických důvodů tajil, a dále proto, že u jaderných katastrof hraje důležitou roli čas. Mnohé zdravotní následky se projeví až po dlouhé době, rakovina má pomalý nástup, a nelze tedy s jistotou říci, které případy rakovinového bujení byly způsobeny výbuchem v Černobylu, a které by vznikly i bez této havárie. (*MAAE, 1992*)

Havárie měla samozřejmě psychické důsledky pro obyvatelstvo zasaženého území. Zhoršená psychika se odrazila i na zdraví obyvatelstva. Zvýšila se konzumace alkoholu a cigaret a změnily se i dietní návyky obyvatelstva. Některá úmrtí v důsledku sebevražd, cirhózy jater a rakoviny plic lze považovat za nepřímé zdravotní důsledky černobylské havárie. (*Baverstock et Williams, 2006*)

V blízkém okolí Černobylu šlo asi 100 tisíc žen na potrat. Ty, které se rozhodly si dítě nechat, byly hospitalizovány v Kyjevě v Centru péče o matku a dítě. Z důvodu obav z kontaminace mateřského mléka nesměly matky vycházet ven a byla jim podávána nekontaminovaná strava. (*Damveld, 1992*)

5.8. Oběti černobylské havárie

Bezprostředně po výbuchu zemřelo 42 lidí. Byli to zaměstnanci elektrárny, hasiči a pilot vrtulníku. Dostali dávky mezi 4 a 16 sievertů a zemřeli na syndrom akutního ozáření. Přesný počet bezprostředních obětí se však nedá s jistotou určit, neboť mnozí záchranní pracovníci přítomní na místě havárie nebyli dále sledováni. Zdá se však, že jich zemřelo jen několik, protože byli vystaveni záření na krátkou dobu. (IAEA, 2006; Comby, 2007)

Počet přímých obětí Černobylu je pravděpodobně 40 až 50, rozhodně ne stovky tisíc nebo miliony, jak uváděly některé zdroje. Zjistit ovšem celkové množství obětí katastrofy je velmi obtížné vzhledem k výše uvedeným okolnostem (zatajování informací bývalým Sovětským svazem, pomalý nástup onemocnění rakovinou). Odhaduje se, že v důsledku černobylské havárie zemřelo asi 4000 lidí. Kromě havarijních pracovníků to bylo asi 10 dětí, které zemřely na rakovinu štítné žlázy, a asi 3940 lidí, kteří zemřeli na rakovinu způsobenou ozářením. Počet přímých nebo i nepřímých černobylských obětí je téměř bezvýznamný ve srovnání s počtem obětí tabáku, alkoholismu – zvláště akutního problému v bývalém Sovětském svazu – a špatné výživy. (IAEA, 2006; Comby, 2007)

5.9. Dětská nemocnost v oblasti černobylské elektrárny po jejím výbuchu

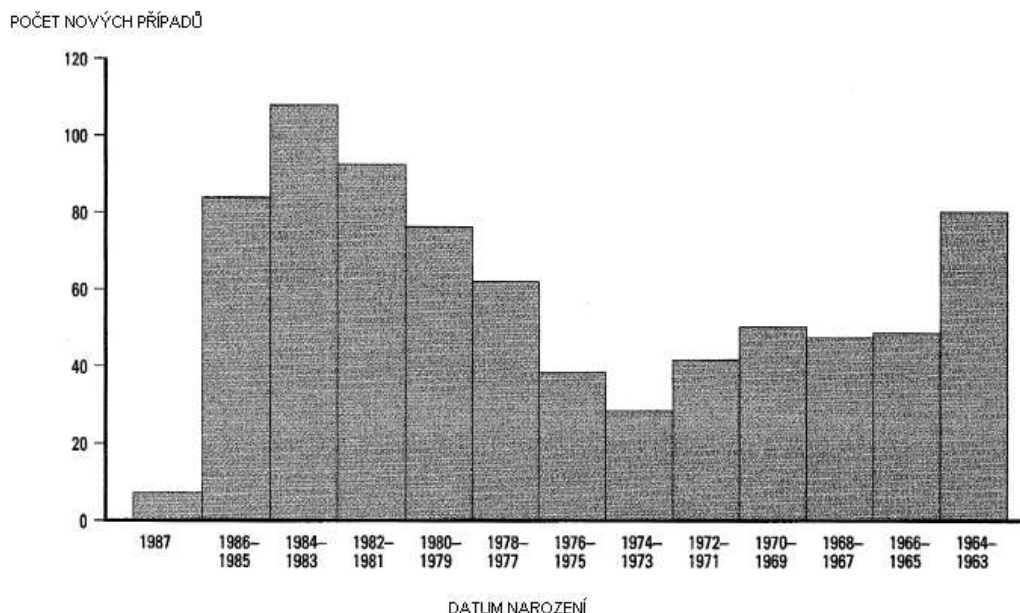
5.9.1. Rakovina štítné žlázy

Hormon štítné žlázy thyroxin obsahuje jód. Radioaktivní jód uvolněný do ovzduší po černobylské havárii se navázal do molekuly thyroxinu místo neradioaktivního jódu a vyvolal u obyvatelstva rakovinu štítné žlázy. (Comby, 2007)

Na rakovinu štítné žlázy jsou citlivé především děti, protože jejich štítná žláza je aktivnější než u dospělých, a tak absorbuje větší množství radioaktivního jódu. Výzkum, který se zabýval výskytem rakoviny štítné žlázy, sledoval období mezi lety 1986 až 1995, přičemž nejvyšší výskyt rakoviny štítné žlázy u dětí do 15 let byl zaznamenán v roce 1995. To jen potvrzuje, že nástup rakoviny je pomalý, a proto je těžké bezprostředně po havárii stanovit její zdravotní důsledky pro obyvatelstvo. Na grafu č. 2 vidíme, že rakovina štítné žlázy nejvíce zasáhla děti narozené v letech 1983-84, kterým tedy v době havárie byly 2-3 roky. (Bleuer et al., 1997)

Rakovina štítné žlázy bývá smrtelná jen pro malé procento pacientů. Došlo sice k jejímu nárůstu u dětí a adolescentů v postižené oblasti, ale bylo zde doloženo jen 9 úmrtí v důsledku rakoviny štítné žlázy do roku 2006. (IAEA, 2006)

Graf č. 2: Počet nových případů rakoviny štítné žlázy v závislosti na datu narození (1963-1987), diagnostikováno mezi lety 1986-1995.



(Bleuer et al., 1997, upraveno)

5.9.2. Další onemocnění dětí v důsledku černobylské havárie

Z nemocí zažívacího ústrojí se u dětí objevil zejména zánět žaludeční sliznice a dvanáctníku a onemocnění žlučových cest. Vzrostl výskyt anémie, což mohlo souviset se zhoršenou kvalitou přijímané stravy. Dále se zvýšil výskyt onemocnění nervového systému a dýchacích cest, zejména chronická angína. (Lomat et al., 1997)

5.10. Kvalita životního prostředí v zakázané zóně

5.10.1. Vliv na živočichy v okolí Černobylu

Dvacet let po výbuchu Černobylu byl proveden výzkum v třicetakilometrové zakázané zóně. Na první pohled se zdá, že se zde nacházejí prosperující ekosystémy. Skutečně tomu tak částečně je, protože zde nežijí téměř žádní lidé, kteří by narušovali zdejší životní prostředí.

Provedený výzkum však ukázal, že výbuch Černobylu měl vliv na populace zdejších lesních ptáků. Tyto následky přetrvávaly ještě dvacet let po výbuchu. Výzkumníci počítali všechny ptáky, které viděli nebo slyšeli během pěti minut ve stometrových intervalech v zakázané zóně nebo poblíž ní. Na těch místech, kde počítali výskyt ptáků, měřili také úroveň radiace. Ukázalo se, že v místech s nejvyšší úrovní radiace je méně než polovina

druhů lesních ptáků oproti místům s nejnižší úrovní radiace. Početnost ptáků (počet kusů ptáků) na nejvíce zasažených místech klesla o třetinu oproti místům nejméně zasaženým. (Bradbury, 2007)

Dále byl v okolí Černobylu proveden výzkum na menších savcích, jako jsou liška, vlk, myš, vydra, srna, prase a zajíc. Nebyly zjištěny žádné výrazné morfologické změny. Pouze u drobnějších hlodavců bylo zjištěno zvětšení sleziny, která byla přibližně třikrát větší, než je obvyklé. Podle této studie nejsou důsledky černobylské havárie na rozmanitost a hustotu populací savců v zakázané zóně větší než důsledky jiných lidských aktivit, jako jsou zemědělská činnost, nadměrné spásání a odlesňování. (Baker et al., 1996)

Na druhu vlaštovky obecné byl proveden výzkum, jaký vliv měl výbuch Černobylu na úspěšnost samců při páření. Samice vlaštovky si vybírá samce k páření podle znaků, které jsou zvláště náchylné k mutacím (červené zbarvení peří na hlavě samce, velikost ocasu). Výbuch Černobylu ovlivnil vyšší výskyt mutací u samců druhu vlaštovky obecné, což se projevilo v asymetrii jejich ocasu. Tyto samci s asymetrickým ocasem byli pak méně úspěšní při páření. (Møller et Mousseau, 2003)

5.10.2. Vliv na rostliny v okolí Černobylu

Výzkum na rostlinných druzích trnovník akát, jeřáb obecný a heřmánek *Matricia perforata* prokázal vliv černobylské havárie na fenotyp těchto rostlinných druhů. Výzkum byl prováděn na listech trnovníku a jeřábu a na květech heřmánku. Byla sledována asymetrie listů a květů, a bylo zjištěno, že jejich asymetrie je v černobylské oblasti třikrát až čtyřikrát větší než v oblastech od Černobylu vzdálených. Zajímavé je, že i u vlaštovky obecné byla v okolí Černobylu zjištěna asymetrie ve tvaru ocasu samců třikrát až čtyřikrát větší než v oblastech od Černobylu vzdálených. Mutace těchto rostlinných druhů způsobená radioaktivním izotopem cesia ¹³⁷Cs měla negativní vliv na růst, plodnost i přežití rostlin. (Møller, 1998)

5.11. Radioaktivní zamoření vzdálenějších oblastí

V červnu 1986 začal monitoring vně třicetakilometrové zakázané zóny. Bylo provedeno mnoho měření, ale málokterá byla zveřejněna. Jedna velmi zamořená oblast byla objevena 80 km severozápadně od Černobylu. V dalších dvou letech bylo objeveno několik dalších vysoce zamořených lokalit: Mogilevská a Gomelská oblast (asi 100-200 km od Černobylu), dále Žitomirská a Brjanská oblast (jižně od Kyjeva). (Damveld, 1992)

Jinak je to se zvyšující se vzdáleností od jaderné elektrárny v Černobylu. Je třeba brát v potaz, že se radiace se vzdáleností výrazně snižuje, proto nemohlo být západoevropské obyvatelstvo zasaženo na zdraví. Psychické důsledky havárie na obyvatelstvo byly výraznější než důsledky ozáření, protože mnoho žen v málo zasažených evropských státech se rozhodlo podstoupit po černobylské havárii potrat z obavy o zdraví plodu. V západní Evropě bylo nejvíce zasaženo zářením Německo, a to dávkou o velikosti 0,4 mSv. Přitom u jednorázových dávek nižších než 100 mSv je riziko pro plod nulové. (*Comby, 2007*)

V Bavorsku byl proveden výzkum, jaký vliv měla černobylská havárie na výskyt malformací v tomto po nehodě nejvíce zamořeném německém státu. Měření cesia v půdě ukázalo, že jižní Bavorsko bylo podstatně více zasaženo než severní Bavorsko, proto byl výzkum prováděn pro každou část území zvlášť. Vzhledem k tomu, že nebyl zaznamenán výrazný rozdíl ve výskytu malformací mezi jižním a severním Bavorskem, nesouvisel spád radioaktivního cesia v Bavorsku po černobylské havárii s výskytem malformací na tomto území. (*Irl et al., 1995*)

V Maďarsku byl proveden výzkum, který sledoval výskyt dětské leukémie. Cílem bylo zjistit, zda výbuch jaderné elektrárny v Černobylu způsobil nárůst v počtu případů leukémie u dětí. Celosvětový trend je takový, že počet případů dětské leukémie se zvyšuje každý rok přibližně o 0,7 %. Ke zjištění vlivu černobylské havárie na výskyt dětské leukémie v Maďarsku bylo proto potřeba užít interpolační model, který počítal s tímto zvyšujícím se trendem. Průzkum prováděný v letech 1973-2002 využívající data z Národního pediatrického onkologického registru v Maďarsku ukázal, že v důsledku jaderné havárie v Černobylu nedošlo v Maďarsku ke statisticky významnému nárůstu v počtu případů dětské leukémie. (*Török et al, 2005*)

ZÁVĚR

Domnívám se, že v současné době, kdy obnovitelné zdroje energie, jako jsou například vodní, větrná či solární energie, nemohou pokrýt stále vzrůstající potřeby moderní civilizace a energii získanou spalováním fosilních paliv nelze považovat za ekologickou, je jaderná energie jediným naším současným reálným řešením. Není sice ideální variantou, neboť otázka ukládání radioaktivních odpadů není stále zcela uspokojivě dořešena, nicméně paralelně probíhá intenzivní mezinárodní výzkum, který si klade za cíl tento problém vyřešit. Produkce jaderné energie nezatěžuje výrazně životní prostředí a poskytuje velké množství energie, které je schopné pokrýt nároky společnosti.

Odlišná byla situace v Černobylu, kde uniklo do ovzduší velké množství radioaktivity následkem havárie v dubnu roku 1986. V černobylské elektrárně došlo k bezprecedentnímu selhání lidského faktoru, neboť personál obsluhující reaktor před jeho výbuchem nedodržel základní bezpečnostní předpisy a odklonil se od plánovaného průběhu experimentu. Podobná havárie by se tedy již neměla opakovat, protože dnes se vyrábějí podstatně dokonalejší reaktory s kontejnmentem, kterými Černobyl nebyl vybaven. Výbuch jaderné elektrárny v Černobylu tak znatelně zbrzdil vývoj jaderné energetiky, neboť obyvatelé začali mít strach z provozu jaderných elektráren i ve státech, kde mají jaderné elektrárny daleko dokonalejší a sofistikovanější bezpečnostní opatření, než jakými disponoval Černobyl.

Pro srovnání bych zmínila havárii na Three Mile Island v USA v roce 1979. Havárie byla z vnějšího pohledu jednou z nejhorších, které si dokážeme představit. Palivo se roztavilo a jeho zbytky leží v ruinách na dně tlakové nádoby. Přesto radioaktivita zůstala téměř uzavřena v kontejnmentu a z reaktorové nádoby uniklo jen velmi malé množství radioaktivních prvků. (*Moore, 2007*)

K tomu mohu uvést, že také díky těmto skutečnostem byla tato havárie klasifikována Mezinárodní agenturou pro atomovou energii „pouhým“ stupněm 5 na mezinárodní stupnici INES (oproti havárii jaderné elektrárny v Černobylu označené maximálním stupněm 7).

Rovněž i vzhledem k výše uvedeným faktům se domnívám, že k dosažení energetické soběstačnosti na základě současného vědeckého poznání jiná reálná možnost než výroba jaderné energie neexistuje.

SEZNAM LITERATURY

- APSIMON H. M., WILSON J. J. N. et SIMMS K. L., 1989: Analysis of the Dispersal and Deposition of Radionuclides from Chernobyl Across Europe. –Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 425/1869: 365-405.
- BAKER R. J., HAMILTON M. J., VAN DEN BUSSCHE R. A., WIGGINS L. E., SUGG D. W., SMITH M. H., LOMAKIN M. D., GASCHAK S. P., BUNDOVA E. G., RUDENSKAYA G. A. et CHESSER R. K., 1996: Small Mammals from the Most Radioactive Sites near the Chernobyl Nuclear Power Plant. – Journal of Mammalogy 77/1: 155-170.
- BARAN V., 2002: Člověk a hmotný svět – jaderná energie pro a proti. In: BARAN V.: Jaderná energetika a další problémy moderní civilizace. – Academia, Praha: 13-58.
- BARNABY F., 1986: Chernobyl: The Consequences in Europe. – Ambio 15/6: 332-334.
- BAVERSTOCK K. et WILLIAMS D., 2006: The Chernobyl Accident 20 Years on: An Assessment of the Health Consequences and the International Response. – Environmental Health Perspectives 114/9: 1312-1317.
- BLEUER J. P., AVERKIN Y. I. et ABELIN T., 1997: Chernobyl-Related Thyroid Cancer: What Evidence for Role of Short-Lived Iodines? –Environmental Health Perspectives 105/Supplement 6: Radiation and Human Health: 1483-1486.
- BRADBURY J., 2007: Chernobyl: An Ecosystem Disaster? – Frontiers in Ecology and the Environment 5/8: 401.
- BRANIŠ M., PIVNIČKA K., BENEŠOVÁ L., PUŠOVÁ R., TONIKA J. et HOVORKA J., 2004: Výkladový slovník vybraných termínů z oblasti ochrany životního prostředí a ekologie. – Karolinum, Praha: 48 s.
- COMBY B., MOORE P. et LOVELOCK J., 2007: Environmentalisté pro jadernou energii. – Pragma, Praha: 321 s.
- ČESKÉ ENERGETICKÉ ZÁVODY, 1991: Havárie v jaderné elektrárně Černobyl. – ČEZ, oddělení Public Realations, Praha: 8 s.
- DAMVELD H., 1992: Neštěstí bez konce. – Regionální článek Hnutí Brontosaurus Pardubice, Pardubice: 40 s.
- DANELL K., NELIN P. et WICKMAN G., 1989: ¹³⁷Caesium in Northern Swedish Moose: The First Year After the Chernobyl Accident. – Ambio 18/2: 108-111.

- IAEA, 1992: Mezinárodní projekt Černobyl. – Florenc, Praha: 48 s.
- IAEA, 2006: Dědictví Černobylu: Zdravotní, ekologické a sociálně-ekonomické dopady. Doporučení vládám Běloruska, Ruské federace a Ukrajiny. – ČSVTS v koedici s Českou nukleární společností, Týn nad Vltavou: 52 s.
- IRL C., SCHOETZAU A., VAN SANTEN F. et GROSCHE B., 1995: Birth Prevalence of Congenital Malformations in Bavaria, Germany, after the Chernobyl Accident. – European Journal of Epidemiology 11/6: 621-625.
- LOMAT L., GALBURT G., QUASTEL M. R., POLYAKOV S., OKEANOV A. et ROZIN S., 1997: Incidence of Childhood Disease in Belarus Associated with the Chernobyl Accident. – Environmental Health Perspectives 105/Supplement 6: Radiation and Human Health: 1529-1532.
- MAREK J., 2000: Jaderná energie. – České energetické závody, sekce komunikace, Praha: 72 s.
- MØLLER A. P., 1998: Developmental Instability of Plants and Radiation from Chernobyl. – Oikos 81/3: 444-448.
- MØLLER A. P. et MOUSSEAU T. A., 2003: Mutation and Sexual Selection: A Test Using Barn Swallows from Chernobyl. – Evolution 57/9: 2139-2146.
- PEŘINA F., MAREK J. et CZIVIŠ G., 1986: Jaderná energetika a životní prostředí. – Nakladatelství technické literatury, Praha: 148 s.
- PIVNIČKA K., 1984: Metabolismus společenstev. In: PIVNIČKA K.: Ekologie. – Státní pedagogické nakladatelství, Praha: 145-156.
- POLEDNE A., 2001: Vzpouora umělého slunce – jaderné havárie. In: POLEDNE A.: Největší katastrofy 20. století. – Volvox Globator, Praha: 131-140.
- STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST: zákon č. 18/1997 Sb., atomový zákon – SÚJB, online: http://www.sujb.cz/?c_id=229, cit. 25.4.2010.
- STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST: vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. – SÚJB, online: http://www.sujb.cz/?c_id=87, cit. 25.4.2010.
- STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST: Úložiště radioaktivních odpadů (ÚRAO) – SÚJB, online: http://www.sujb.cz/?c_id=537, cit. 25.4.2010.

- TÖRÖK S., BORGULYA G., LOBMAYER P., JAKAB Z., SCHULER D. et FEKETE G., 2005: Childhood Leukaemia Incidence in Hungary, 1973-2002. Interpolation Model for Analysing the Possible Effects of the Chernobyl Accident. – European Journal of Epidemiology 20/11: 899-906.
- VANĚK M., 1996: Černobyl – krize věrohodnosti. In: VANĚK M.: Nedalo se tady dýchat. – Maxdorf, Praha: 80-86.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2010: World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements – WNA, online:
<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>, cit. 22.4.2010.

PŘÍLOHA 1: PŘEHLED JADERNÝCH REAKTORŮ VE SVĚTĚ, SPOTŘEBA URANU.

ZEMĚ	PRODUKCE JADERNÉ ELEKTRINY V ROCE 2008		REAKTORY V PROVOZU		REAKTORY VE VÝSTAVBĚ		PLÁNOVANÉ REAKTORY		NAVRHOVANÉ REAKTORY		SPOTŘEBA URANU
	V miliardách kWh	% vyrobené energie	1.dubna 2010	1.dubna 2010	1.dubna 2010	1.dubna 2010	duben 2010	duben 2010	duben 2010	duben 2010	
			počet	El.výkon v MWe	počet	El.výkon v MWe	počet	El.výkon MWe	počet	El.výkon v MWe	v tunách
Argentina	6.8	6.2	2	935	1	692	2	767	1	740	123
Arménie	2.3	39.4	1	376	0	0	1	1060			55
Bangladěš	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Bělorusko	0	0	0	0	0	0	2	2000	2	2000	0
Belgie	43.4	53.8	7	5943	0	0	0	0	0	0	1052
Brazílie	14.0	3.1	2	1901	0	0	1	1245	4	4000	311
Bulharsko	14.7	32.9	2	1906	0	0	2	1900	0	0	272
Kanada	88.6	14.8	18	12679	2	1500	4	4400	3	3800	1675
Čína	65.3	2.2	11	8587	21	22960	36	40510	120	120000	2875
Česká rep.	25.0	32.5	6	3686	0	0	0	0	2	3400	678
Egypt	0	0	0	0	0	0	1	1000	1	1000	0
Finsko	22.0	29.7	4	2696	1	1600	0	0	1	1000	1149
Francie	418.3	76.2	58	63236	1	1630	1	1630	1	1630	10153
Německo	140.9	28.3	17	20339	0	0	0	0	0	0	3453
Maďarsko	14.0	37.2	4	1880	0	0	0	0	2	2000	295
Indie	13.2	2.0	19	4183	4	2572	20	16740	34	41000	908
Indonésie	0	0	0	0	0	0	2	2000	4	4000	0
Írán	0	0	0	0	1	915	2	1900	1	300	148
Izrael	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Itálie	0	0	0	0	0	0	0	0	10	17000	0
Japonsko	240.5	24.9	54	47102	1	1373	13	17915	1	1300	8003
Kazachstán	0	0	0	0	0	0	2	600	2	600	0
S. Korea	0	0	0	0	0	0	0	0	1	950	0
J. Korea	144.3	35.6	20	17716	6	6700	6	8190	0	0	3804
Litva	9.1	72.9	0	0	0	0	0	0	2	3400	0
Mexiko	9.4	4.0	2	1310	0	0	0	0	2	2000	253
Nizozemsko	3.9	3.8	1	485	0	0	0	0	1	1000	107
Pákistán	1.7	1.9	2	400	1	300	2	600	2	2000	68
Polsko	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6000	0
Rumunsko	7.1	17.5	2	1310	0	0	2	1310	1	655	175
Rusko	152.1	16.9	32	22811	8	6380	16	18300	30	28000	4135
Slovensko	15.5	56.4	4	1760	2	840	0	0	1	1200	269
Slovinsko	6.0	41.7	1	696	0	0	0	0	1	1000	145
JAR	12.7	5.3	2	1842	0	0	3	3565	24	4000	321
Španělsko	56.4	18.3	8	7448	0	0	0	0	0	0	1458
Švédsko	61.3	42.0	10	9399	0	0	0	0	0	0	1537
Švýcarsko	26.3	39.2	5	3252	0	0	0	0	3	4000	557
Thajsko	0	0	0	0	0	0	2	2000	4	4000	0
Turecko	0	0	0	0	0	0	2	2400	1	1200	0
Ukrajina	84.3	47.4	15	13168	0	0	2	1900	20	27000	2031
SAE	0	0	0	0	0	0	4	5600	10	14400	0
VB	52.5	13.5	19	11035	0	0	4	6600	6	8600	2235
USA	809.0	19.7	104	101119	1	1180	9	11800	23	33000	19538

ZEMĚ	PRODUKCE JADERNÉ ELEKTŘINY V ROCE 2008		REAKTORY V PROVOZU		REAKTORY VE VÝSTAVBĚ		PLÁNOVANÉ REAKTORY		NAVRHOVANÉ REAKTORY		SPOTŘEBA URANU
			1.dubna 2010		1.dubna 2010		duben 2010		duben 2010		
	V miliardách kWh	% vyrobené energie	počet	El.výkon v MWe	počet	El.výkon v MWe	počet	El.výkon MWe	počet	El.výkon v MWe	v tunách
Vietnam	0	0	0	0	0	0	2	2000	8	8000	0
SVĚT	2601	15	438	374,127	52	51,242	143	157,932	344	363,175	68,646

(WNA, 2010, upraveno)